



ANÁLISIS DE LA DEFORMABILIDAD DE LOS RELLENOS SANITARIOS CURVA DE RODAS Y LA PRADERA VASO LA CARRILERA. MEDELLÍN – ANTIOQUIA – COLOMBIA.

**Carlos Andrés Ordóñez Ante Ingeniero Geólogo Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones
Magíster en Ingeniería - Geotecnia Docente Politécnico Colombiano J.I.C. Medellín Colombia.**

**Manuel Roberto Villarraga Herrera Ingeniero Civil MSc Geotecnia Gerente INTEINSA. Docente
Universidad Nacional Medellín Colombia.**

Dirección⁽¹⁾: (del autor principal)

Calle: 8 Sur 83 A 21 casa 202 Urbanización Ciudad: Medellín Colombia CP: xxxxxx
Colinas del Rodeo.
Tel: 3529660 Fax: 3529660 e-mail: caosony@une.net.co

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del análisis, mediante la implementación de metodologías recientes para evaluar el comportamiento de los residuos sólidos urbanos a partir de la información de instrumentación geotécnica recopilada durante varios años en los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera (vaso La Carrilera); los cuales reciben todos los desechos sólidos generados en la ciudad de Medellín (Colombia) y sus alrededores.

Se realizó un análisis de los registros de asentamientos de los rellenos sanitarios ya mencionados, con el cual se obtuvo un modelo geotécnico de tipo hiperbólico que describe en el tiempo los asentamientos registrados por cada punto de control topográfico ubicado sobre la masa de residuos; logrando conocer tasas de asentamientos, tiempos en que se presentarían los mismos y asentamientos últimos esperados para cada relleno; los resultados anteriores se compararon con los obtenidos en otros rellenos sanitarios, localizados en diferentes países. Se analizó también la variación de las presiones de poros en el tiempo, y su correlación con los asentamientos; obteniéndose índices comparativos de compresibilidad para cada relleno sanitario, a partir de datos de campo registrados en la instrumentación en un periodo de varios años.

Este trabajo fue financiado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y por la empresa INTEINSA.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente un relleno sanitario consiste en el enterramiento tecnificado de los residuos sólidos mediante la colocación de los mismos en capas sucesivas, apisonadas y compactadas; la cobertura definitiva cumple funciones de aislamiento e impermeabilización y posterior acondicionamiento por revegetalización.

Los rellenos sanitarios se han concebido desde el punto de vista ambiental y sanitario, solo recientemente a raíz de deslizamientos ocurridos en varios de ellos a nivel nacional e internacional tales como: Cincinati, 1996; Doña Juana – Santa Fé de Bogotá, 1997; Filipinas, 2000; se ha tomado conciencia en lo importante de considerar estos depósitos como materiales geotécnicos.

En el año de 1955 la ciudad de Medellín (Colombia), contaba con 400 mil habitantes y la producción diaria de desechos sólidos era de aproximadamente 100 toneladas; al igual que muchas otras ciudades del país, no era ajena al problema de la generación de los residuos sólidos, durante mucho tiempo convivió con el problema de la acumulación de los desechos sólidos en el propio centro de la ciudad o los mismos eran tirados al río Medellín.

Desde el año de 1977, a raíz de un Acuerdo Municipal, los desechos sólidos dejaron de arrojarse al río Medellín y comenzaron a depositarse en un lote deprimido en el sector de Moravia, donde se disponían a cielo abierto y sin ningún tratamiento. El objetivo inicial era construir un relleno, pero jamás se adelantaron los estudios ni los pasos

pertinentes para lograrlo, al ser arrojados allí los desechos sólidos sin ningún control, esta zona se fue convirtiendo en un foco de contaminación para la ciudad. Con el tiempo los desechos sólidos fueron formando una montaña, la cual aumentaba progresivamente su altura con la acumulación de las casi 500 toneladas diarias que llegaban allí, alcanzando 40 metros de altura; y generando un problema social de grandes proporciones en sus alrededores. En el año de 1978, Planeación Metropolitana contrato con la Escuela Federal de Lausan, Suiza la realización de un estudio sobre los desechos sólidos y su disposición final para la ciudad de Medellín y su Área Metropolitana, el cual terminó en el año de 1980; como resultado de lo anterior se recomendó al municipio de Medellín la construcción del relleno sanitario Curva de Rodas. A partir del año 2003 entra en servicio La Pradera donde actualmente se disponen de manera técnica más de 2000 toneladas diarias de desechos sólidos.

Varios autores: Ferreira, G (2000); Park, H. (2002); Qian, X. (2002); Machado, S. (2002); coinciden en afirmar que los residuos sólidos urbanos tienen propiedades muy heterogéneas y anisotrópicas que hacen muy difícil su caracterización. Además su comportamiento involucra aspectos como el tiempo, la temperatura, y las condiciones ambientales.

La composición de los residuos sólidos en diferentes ciudades del mundo se puede observar en la tabla 1; dicha composición está relacionada con las condiciones económicas propias de cada lugar; por lo tanto las poblaciones con mayores recursos (EEUU, Reino Unido), generan menores contenidos de materia orgánica; mientras que las poblaciones llamadas tercermundistas (Colombia, Kenia, Brasil), generan mayor cantidad de materia orgánica; lo anterior demuestra como la composición de los desechos sólidos varía de acuerdo con el país, su grado de desarrollo y su nivel cultural.

Actualmente en Colombia se tienen instrumentados los rellenos sanitarios de las ciudades de Santa Fé de Bogotá (relleno sanitario Doña Juana) y de Medellín (rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera); en estos, se han instalado un número significativo de inclinómetros, piezómetros y puntos de control topográfico, para así llevar a cabo el monitoreo de cada relleno sanitario y conocer su comportamiento y variabilidad en el tiempo en cuanto a movimientos, deformaciones, y presiones internas.

El estudio de los aspectos geotécnicos de los rellenos sanitarios se suele agrupar dentro de la ciencia llamada “Geotecnia Ambiental” que es el encuentro entre la geotecnia clásica y las ciencias ambientales. Según Espinace R. et al (2002); las primeras referencias específicas sobre el tema, se encuentran en los años setenta, con la creación de un subcomité de la ASTM, con el título de “geotechnics of waste management”. El primer evento donde se trata más profundamente el tema es en el IX Congreso Internacional de la ISSMFE (Tokio, 1977), donde se dedicó a este tema una sesión especial. En el congreso siguiente celebrado en Estocolmo en el año de 1981, el interés crece al incluir como una de las sesiones la de “Environmental Geotechnics”. Este interés aumenta en los congresos siguientes.

Actualmente, los principales avances sobre geotecnia de Rellenos Sanitarios, son canalizados por el Comité Técnico TC 5 denominado “Geotecnia Ambiental”, de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), el cual fue creado en el año de 1994. Durante el tercer Congreso Internacional de Geotecnia Ambiental, realizado en 1998 en Lisboa, se presentó el estado del arte desagregado entre otros, en los siguientes temas: Sistemas de Monitoreo; Estabilidad de Residuos; Rellenos Sanitarios Controlados; Comportamiento de Rellenos Sanitarios bajo Condiciones de Carga Extremas (por ejemplo terremotos). Espinace R. et al (2002).

Relleno Sanitario	Materia Orgánica %	Papel %	Plástico – Caucho %	Textil %	Madera - Cuero %	Metal %	Vidrio %	Minerales %	Otros %
Sao Paulo (Brasil) R. S. Bandeirantes	55	2.0	19	3	4.0	2	2	10	--
Recife (Brasil) R. S. Muribeca	60	15	8	--	--	2	2	--	13
Belo Horizonte (Brasil)	64.4	13.5	6.5	--	--	2.7	2.2	--	10.7
Salvador (Brasil)	61.8	11.7	9.8	--	--	4.3	3.9	--	8.5
Bangkok (Tailandia)	44	25	--	3	7	1	1	--	19
Bogota (Colombia) R. S. Doña Juana	49.53	13.61	20.46	3.56	3.19	3.35	4.22	1.99	--
Medellín (Colombia) R. S. Curva de Rodas	59.48	9.85	11.73	3.22	--	1.31	2.65	--	11.76
Pekín (China)	45	5	1	--	1	1	1		46
Nairobi (Kenia)	74	12	5	--	--	3	4		2
Hong Kong	15	3	--	10	7	3	10		22
New York (EEUU)	20	22	--	--	3	5	6		46
Estambul (Turquía)	61	10	3	3	6	2	1		14
Atenas (Grecia)	59	19	7	--	4	4	2		5
Cochabamba (Bolivia)	71	2	3	--	1	1	1		21
Varsovia (Polonia)	32.6	22.2	9.7	4.5	--	4.9	11.9		14.2
Italia	42.1	22.3	7.2	--	--	3.0	7.1		18.3
Reino Unido	23.4	33.9	4.2	--	--	7.1	14.4		17.0
Japón	22.2	31.1	15.5	--	--	6.4	13.8		10.6

Tabla 1. Composición de los residuos sólidos municipales para diferentes lugares del mundo (Modificado de Carvalho 1999 y Farias 2000).



2. OBJETIVOS

- Verificar y calibrar un modelo geotécnico que permita conocer el comportamiento real de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera.
- Caracterización de los residuos sólidos desde el punto de vista físico.
- Analizar las propiedades de resistencia y deformabilidad de los desechos sólidos a partir de información secundaria existente.

3. METODOLOGIA

3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Lo primero que se realizó fue una extensa revisión bibliográfica sobre trabajos de caracterización, instrumentación e intentos de modelación de algunos rellenos sanitarios en Colombia y en el mundo, con lo anterior se logró dilucidar que este era un tema que apenas empezaba a inquietar a la comunidad geotécnica internacional.

En Colombia se tienen los trabajos realizados en el relleno sanitario Doña Juana por Velandia E. (2000); Espinosa A. y González A. J. (2001); Villarraga M.; Rodríguez J. y Velandia E. (2001); Valverde J. y Sandoval J. (2005). En el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín se consultaron trabajos realizados por las empresas INTEGRAL S. A. (2001); HIDROSUELOS (2002) e INTEINSA (2005). En La Pradera se consultaron los estudios realizados en el vaso La Carrilera y La Música por la empresa INTEINSA (2006).

A nivel internacional se tienen trabajos realizados en universidades de Brasil, España, Chile y México.

3.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se recopiló toda la información existente de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera (vaso La Carrilera), obtenida mediante registros de instrumentación de puntos de control topográfico, inclinómetros, y piezómetros, dispuestos sobre la masa de residuos, realizada por las empresas Antisismos Ltda.; INTEGRAL S.A. e INTEINSA; con aprobación de las Empresas Varias de Medellín.

Los asentamientos registrados por los puntos de control topográfico, fueron procesados y analizados desde mediados del año 2004 hasta el 31 de diciembre de 2005, para el Relleno Sanitario La Pradera (vaso La Carrilera); y desde mediados del año 2002 hasta el mes de junio del año 2006 para el Relleno Sanitario Curva de Rodas; las fechas de corte de las observaciones fueron necesarias con el fin de culminar la etapa de procesamiento y análisis de la información y de esta manera concluir el trabajo.

El análisis de asentamientos de los puntos de control topográfico que poseían mejores registros permitieron conocer su comportamiento en el tiempo, se observó que las fechas de inicio de las mediciones no coinciden para todos los puntos de control topográfico dentro de un mismo relleno sanitario, lo cual es completamente lógico debido a las labores de construcción y adecuación del relleno.

Con los registros de cambios de altura de los puntos de control topográfico, se utilizaron modelos matemáticos empíricos de tipo logarítmico, potencial e hiperbólico los cuales han sido utilizados con éxito en otros rellenos sanitarios del mundo, tal como se describe en el artículo de Ling H. et al (1998). “Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement”.

4. RESULTADOS

4.1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN

La composición física de los residuos sólidos del municipio de Medellín, según fuentes de la Universidad de Antioquia (2002) consistía básicamente en materia orgánica 59.48%, seguido del plástico 11.29%; luego papel 9.85%; textiles 3.22%; escombros 3.22%; vidrio 2.65%; cartón 2.17%; metales 1.31%; caucho 0.44%; cuero 0.34%, y otros elementos 6.03%.

4.2 RELLENO SANITARIO CURVA DE RODAS

El Relleno Sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín, inicio operaciones en el año 1984, llegó a recibir entre 1500 y 2000 toneladas diarias de residuos sólidos y fue clausurado en el mes de Agosto del año 2002, se localiza sobre la margen izquierda de la autopista Medellín – Bogotá, en la cuenca de la quebrada Rodas, de la cual toma su nombre, dista de las comunidades de Machado y Fontidueño ubicadas en los municipios de Bello y Copacabana respectivamente aproximadamente un kilómetro; lo separan diez kilómetros del municipio de Medellín tomando como referencia el llamado punto cero (carabineros). Una panorámica de este relleno sanitario se puede observar en la foto 1. El relleno cuenta con una instrumentación geotécnica que ha permitido monitorear y conocer el comportamiento geotécnico de la masa de residuos desde el año 1998 hasta la fecha, dicha instrumentación esta constituida por los siguientes elementos:

- 20 Inclinómetros de los cuales 6 se encuentran instalados en la masa de residuos sólidos y 14 en terreno natural.
- 98 Piezómetros (10 de tipo casagrande instalados en terreno natural y 88 de alambre vibráctil de los cuales 68 están instalados en la masa de residuos y 20 en terreno natural).
- 25 puntos de control topográfico.
- 1 medidor de caudal de lixiviado.
- 1 Pluviómetro.
- 1 Estación climática.



Foto 1 Panorámica en el año 2004 del relleno sanitario Curva de Rodas (Fuente Ingeniero Nelson Gaona).

4.3 RELLENO SANITARIO LA PRADERA

El Relleno Sanitario La Pradera, se ubica en el área rural del municipio de Don Matías, en la vereda La Pradera, distante aproximadamente 55 km de la ciudad de Medellín, al noroeste del departamento de Antioquia, y próximo al municipio de Barbosa; tiene una altitud media de 1100 msnm y hace parte de la cuenca del río Medellín. Se puede llegar al relleno atravesando los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa por la vía Medellín - Puerto Berrío, que hace parte de la troncal transversal que se desprende de la troncal Norte, en el sector conocido como El Hatillo.

El vaso La Carrilera, que hace parte del relleno, fue clausurado desde el año 2003; cuenta con una instrumentación geotécnica que ha permitido conocer su comportamiento geotécnico, dicha instrumentación está constituida por los siguientes elementos:

- 4 Inclinómetros (tres de ellos instalados en el dique de contención y uno instalado en terreno natural).

- 11 Piezómetros de alambre vibrátil (9 ubicados en la masa de residuos y 2 en el dique de contención).
- 27 puntos de control topográfico (20 ubicados en la masa de residuos y 7 en el dique del ferrocarril).
- 5 pozos de extracción ubicados en la masa de residuos.
- 9 pozos de monitoreo ambiental ubicados en los alrededores del vaso.

A partir del mes de julio del año 2004 se comenzaron a disponer los residuos en el vaso La Música, el cual cuenta con la siguiente instrumentación geotécnica:

- 21 Piezómetros de alambre vibrátil, de los cuales 13 se encuentran instalados en la masa de residuos sólidos, 6 en la fundación y 2 en el dique de contención.
- 2 Inclinómetros instalados en el dique de contención.

En la Foto 2 se puede apreciar una panorámica del año 2004 del Relleno Sanitario La Pradera.



Foto 2 Panorámica relleno sanitario La Pradera (2004) Fuente EEVVM

4.4 FUNCIÓN HIPERBÓLICA UTILIZADA PARA ESTIMAR ASENTAMIENTOS EN RELLENOS SANITARIOS.

Según Qian X, et al (2002), la función hiperbólica ha sido usada con éxito al aproximar la deformación obtenida en algunos problemas geotécnicos tales como el asentamiento de un terraplén apoyado sobre suelos blandos, y la simulación de los resultados de ensayos triaxiales. En el caso del estudio de los asentamientos de un relleno sanitario, la función hiperbólica que se usa se suele escribir así:

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_o} + t/S_{ult}} \quad (1)$$

Donde: S = diferencia entre el asentamiento en un tiempo t_i y el medido en un tiempo t_o ; por ejemplo

$$S = S_i - S_o; \text{ expresado en metros.}$$

t = diferencia entre el tiempo de interés y el tiempo de inicio de las mediciones; por ejemplo

$$t = t_i - t_o; \text{ expresado en días.}$$

$$\rho_o = \text{ tasa inicial de asentamiento en } t = t_o;$$

$$S_{ult} = \text{ asentamiento último.}$$

Los parámetros ρ_o y S_{ult} se determinan transformando la ecuación (1) por medio de las relaciones t/S versus t , obteniéndose una regresión lineal que puede ser escrita así:

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_o} + \frac{t}{S_{ult}}$$

Se puede observar que los recíprocos del intercepto y la pendiente dan ρ_o y S_{ult} respectivamente.

El asentamiento final se obtendrá entre el 80% y el 95% del último valor.

El tiempo para que ocurra el 95% del asentamiento total se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$t_f = 19S_{ult}/\rho_o$$

Al escribir t_o se refiere al tiempo $t = 0$.

4.5 ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS RELLENO SANITARIO CURVA DE RODAS.

El análisis de asentamientos en el relleno sanitario Curva de Rodas involucró los desplazamientos registrados en 14 puntos de control topográfico situados sobre la masa de residuos, de los cuales finalmente se trabajaron siete ya que eran los que poseían los mejores registros de instrumentación, con un tiempo de 1497 días, obtenidos desde mediados del año 2002 hasta junio de 2006.

Las figuras 1 y 2 muestran los resultados de asentamientos para los puntos de control topográfico 2, 3, 12, 13, 14 y 15 con un registro de 1497 días que data desde el 11 de junio de 2002 hasta el 27 de junio de 2006, también se observa que a partir del mes de Junio del año 2002, durante los primeros ciento cuarenta (140) días se dan los mayores asentamientos fluctuando entre 0.34 m y 0.7 m; la pendiente en este intervalo de tiempo es más o menos constante, a partir del cual los asentamientos comienzan a disminuir. El mayor asentamiento para un tiempo de 140 días es reportado por el punto de control topográfico 3 (PCT 3), con un valor de 0.7 m; en este sitio se tiene un espesor de residuos aproximado de 50 m, el cual es superior al que tienen los otros puntos de control topográfico, que muestran asentamientos menores a los registrados en este sitio. El menor asentamiento para un tiempo de 140 días es reportado por el punto de control topográfico 12 (PCT 12), con un valor de 0.34 m; corresponde este punto a un espesor de residuos inferior a 30 m.

4.5.1 Aplicación del Modelo Hiperbólico. El relleno sanitario Curva de Rodas posee 47 puntos de control topográfico, de estos se aplicó el modelo hiperbólico a 7 que son los que poseen registros de asentamientos más largos, tomados desde el 11 de junio del año 2002, hasta julio de 2006.

En la figura 3 se muestra la correlación obtenidas al graficar en un plano cartesiano; siendo la abscisa el tiempo t medido en días y la ordenada la variable t/S obtenida de la relación tiempo en días y asentamientos registrados por la instrumentación en metros; de los puntos de control topográfico 2 y 3, con lo anterior se llega a una regresión lineal con un adecuado coeficiente de correlación entre las variables involucradas, obteniéndose los parámetros ρ_o (tasa de asentamiento inicial teórico del relleno sanitario para cada punto de control topográfico) y S_{ult} (asentamiento último teórico de cada punto de control topográfico dispuesto sobre el relleno sanitario), se obtiene así la ecuación hiperbólica de cada punto de control topográfico la cual describirá los asentamientos en el tiempo de cada punto analizado, el modelo anterior se compara con los registros de asentamientos obtenidos en campo para cada punto, observándose una buena aproximación entre uno y otro.

En la figura 4 se puede observar la serie de puntos del modelo hiperbólico, que describe los asentamientos para el punto de control topográfico 3; en el intervalo de tiempo analizado, se nota que las gráficas tienden a ser asintóticas con una recta paralela al eje de las abscisas, la asíntota se aproxima al valor definido como asentamiento último (S_{ult}); esto evidencia que los asentamientos van disminuyendo gradualmente con el tiempo; al

comparar los asentamientos registrados con la instrumentación de campo y los calculados con las ecuaciones del modelo hiperbólico, se nota una buena aproximación entre uno y otro.

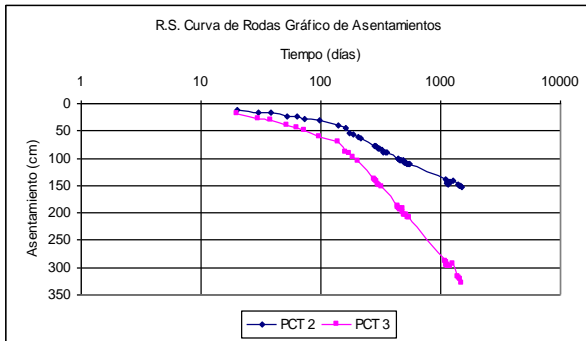


Figura 1 Asentamientos de los PCT 2, 3.

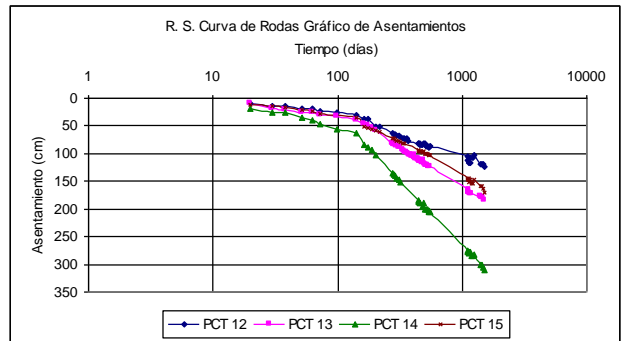


Figura 2 Asentamientos de los PCT 12, 13, 14, 15.

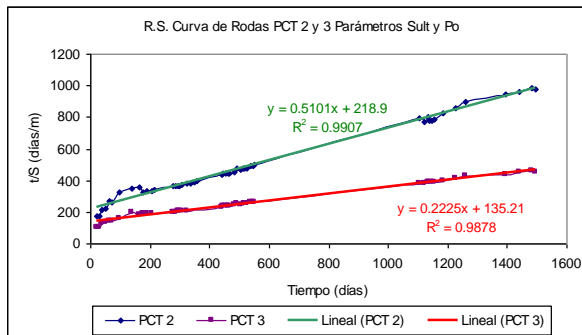


Figura 3 Parámetros Sult y po de los PCT 2 y 3

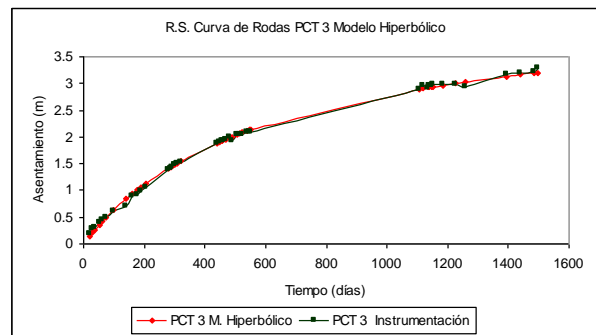


Figura 4 Modelo Hiperbólico del PCT 3

En la tabla 2 se pueden observar los parámetros del modelo hiperbólico de los puntos de control topográfico con mejores registros de asentamientos localizados sobre la masa de residuos sólidos, del Relleno Sanitario Curva de Rodas, al analizar estos resultados; se puede observar un valor mínimo de asentamiento último para la zona de 1.47 m calculado para el punto de control topográfico 12 y un valor máximo de asentamiento último de 4.49 m, el cual se presentará en el área aferente del punto de control 3; estos valores son coherentes con el espesor de residuos que tiene cada punto, ya que el punto de control 12 posee el menor espesor, aproximadamente 30.0 m de residuos, mientras que el punto de control 3 posee 50.0 m de espesor de residuos.

El tiempo promedio para que ocurra el 90% del asentamiento último esperado teóricamente en la Curva de Rodas, a partir de la fecha en que se dispone de instrumentación (junio de 2002); según los registros de asentamientos a los cuales se les pudo aplicar el modelo hiperbólico, con tiempo de 1497 días, es de 13.1 años, el tiempo mínimo es de 9.31 años y el máximo de 14.8 años; se puede observar en la tabla 2 que los puntos donde se tiene mayor espesor de residuos lógicamente tardaran más tiempo en asentarse.

De los puntos con registros más largos, se concluye que el punto de control topográfico que presenta la mayor tasa de asentamiento inicial es el PCT 3, con un valor de 0.0073 m/día, corresponde este sitio al mayor espesor de desechos sólidos (aproximadamente 50.0 m); de todos los puntos analizados; mientras que el punto de control topográfico que muestra la menor tasa de asentamiento inicial es el PCT 15, con un valor de 0.0038 m/día, corresponde este sitio a un espesor aproximado de desechos sólidos de 30.0 m.

El punto de control topográfico PCT 11, con registros de asentamientos desde el mes de junio de 2002 hasta octubre de 2003 tendrá un asentamiento último esperado de 0.78 m, para un espesor aproximado de residuos sólidos de 20.0 m.

Los puntos de control topográfico que presentan la mayor tasa de asentamiento son el PCT 3 y el PCT 14, con valores promedio de 0.0026 m/día y 0.0025 m/día respectivamente, en general se observa que la tasa de asentamientos para todos los puntos disminuye a medida que pasa el tiempo, siendo los primeros 350 días de registros de instrumentación, los que presentan la mayor velocidad de asentamientos, correspondiendo a un valor promedio de 0.0029 m/día, este valor va disminuyendo progresivamente entre 350 y 552 días, a un valor promedio para la zona de 0.0014 m/día, continua su disminución entre 552 y 1497 días a un valor promedio de 0.00074 m/día.

El menor valor de velocidad de asentamiento lo registra el punto 15, correspondiendo a 0.000125 m/día; mientras que el mayor valor lo registra el punto 12 con 0.0027 m/día.

De los anteriores análisis y según el modelo hiperbólico aplicado para los registros de instrumentación disponibles; se puede concluir que el relleno sanitario Curva de Rodas debe cesar sus asentamientos aproximadamente en el año 2017; lo anterior no es una afirmación categórica, requiere de un ajuste y verificación del modelo hiperbólico, el cual una vez analizado con registros de asentamientos más largos permitirá conocer mejor el comportamiento de los rellenos sanitarios Antioqueños, pudiéndose planear un manejo adecuado de los mismos en la etapa post-clausura.

Parámetros Modelo Hiperbólico Relleno Sanitario Curva de Rodas

	Sult (m)	ρ_0 (m/día)	S90 (m)	T90 (años)	Ho (m)	Sult/Ho	Modelo Hiperbólico	Fecha 1ª lectura	Fecha última lectura	r
PCT 2	1.96	0.0045	1.76	10.3	40	0.049	$S=\{t/(218.9+(t/1.9603))\}$	11-06-2002	27-06-2006	0.99
PCT 3	4.49	0.0073	4.04	14.8	50	0.08	$S=\{t/(135.21+(t/4.4943))\}$	11-06-2002	27-06-2006	0.98
PCT 11	0.87	0.00143	0.78	15	20	0.04	$S=(t/(698.931+(t/0.8735)))$	11-06-2002	15-10-2003	0.77
PCT 12	1.47	0.0039	1.33	9.31	30	0.049	$S=(t/(256.2+(t/1.4784)))$	11-06-2002	27-06-2006	0.98
PCT 13	2.53	0.0043	2.28	14.10	30	0.08	$S=(t/(228.02+(t/2.5361)))$	11-06-2002	27-06-2006	0.97
PCT 14	4.26	0.0071	3.84	14.4	45	0.09	$S=(t/(140.44+(t/4.2698)))$	11-06-2002	27-06-2006	0.98
PCT 15	2.2	0.0038	1.98	13.8	30	0.07	$S=(t/(256.52+(t/2.202)))$	11-06-2002	27-06-2006	0.98

Tabla 2 Parámetros modelo hiperbólico de los puntos de control topográfico localizados sobre la masa de residuos del Relleno Sanitario Curva de Rodas.

4.6 ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS RELLENO SANITARIO LA PRADERA VASO LA CARRILERA.

El análisis de asentamientos en el vaso La Carrilera del relleno sanitario La Pradera, se realizó mediante los registros de asentamientos de 22 puntos de control topográfico situados sobre la masa de residuos, de los anteriores 10 puntos de registros fueron útiles debido a que algunos se perdían durante las labores de adecuación del vaso. Las fechas de las nivelaciones iniciales de los diferentes puntos de control topográfico no coinciden ya que algunas comienzan en el mes de junio del año 2004 y otras arrancan en los meses de julio y agosto del mismo año lo cual es completamente normal ya que esto depende del proceso constructivo que se esté ejecutando en el vaso; por efectos prácticos y para poder culminar el estudio, este análisis se realiza hasta las mediciones registradas al 31 de

diciembre del año 2005; se observa una misma tendencia en todas las curvas de asentamientos analizadas para los puntos de control topográficos 4, 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 19 y 34 (Figuras 5 y 6).

4.6.1 Aplicación del modelo hiperbólico en La Pradera vaso La Carrilera. En la figura 7 se muestran las correlaciones obtenidas de los puntos de control topográfico 4 y 5; al graficar en un plano cartesiano, siendo la abscisa el tiempo t medido en días y la ordenada la variable t/S obtenida de la relación tiempo en días y asentamientos registrados por la instrumentación en metros; con lo anterior se llega a una regresión lineal con un adecuado coeficiente de correlación entre las variables involucradas; de esta manera se obtienen los parámetros p_0 (tasa de asentamiento inicial teórico del relleno sanitario para cada punto de control topográfico) y S_{ult} (asentamiento último teórico de cada punto de control topográfico dispuesto sobre el relleno sanitario), obteniéndose así la ecuación hiperbólica de cada punto de control topográfico la cual describirá los asentamientos en el tiempo de cada punto analizado, el modelo anterior se compara con los registros de asentamientos obtenidos en campo para cada punto, observándose una buena aproximación entre uno y otro (figura 8).

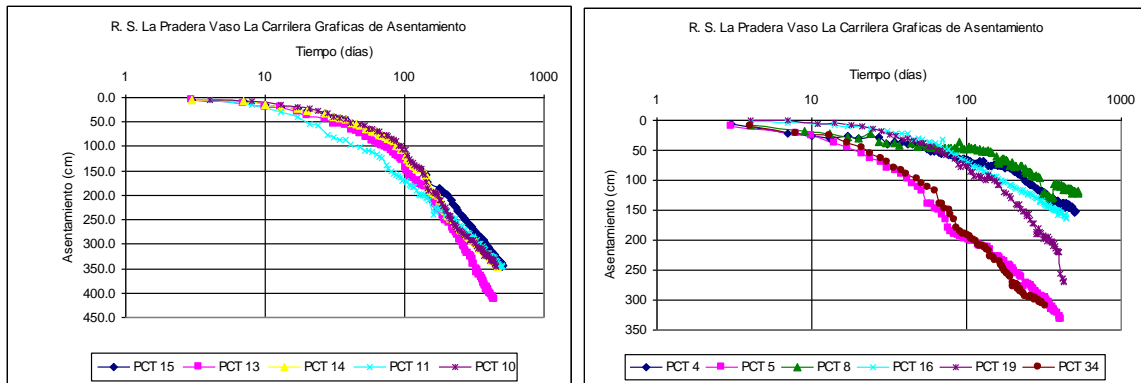


Figura 5 y 6 Asentamientos La Pradera PCT 10, 11, 13, 14, 15, 4, 5, 8, 16, 19, 34.

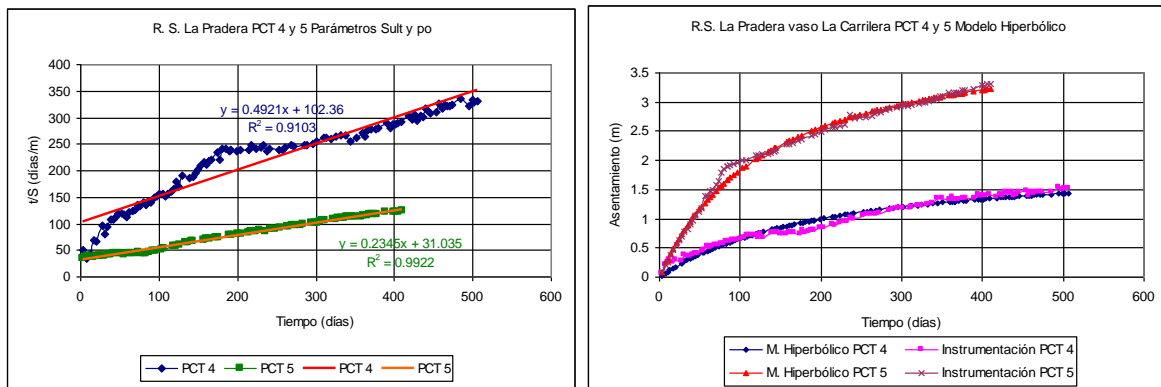


Figura 7 Parámetros S_{ult} y p_0 de los puntos 4 y 5

Figura 8 Modelo Hiperbólico de los puntos 4 y 5

Al analizar los resultados obtenidos al aplicar el modelo hiperbólico, mostrados en la tabla 3, se pueden observar valores mínimos de asentamientos últimos para el vaso que fluctúan entre 2.03 m y 4.6 m; correspondientes a los puntos de control topográfico 4, 5 y 11; y un valor máximo de asentamiento último que fluctúa entre 11.0 m y 18.0 m, correspondiente a los puntos de control topográfico 14, 19 y 34.

**Parámetros Modelo Hiperbólico Relleno Sanitario
La Pradera vaso La Carrilera**

	Sult (m)	ρ_0 (m/día)	S90 (m)	T90 (años)	Ho (m)	Sult/Ho	Modelo Hiperbólico	Fecha primera lectura	Fecha última lectura	r
PCT 4	2.03	0.00976	1.8	4.9	18	0.11	$S=\{t/(102.36+(t/2.0321))\}$	6-07-04	30-12-05	0.95
PCT 5	4.26	0.0322	3.8	3.2	20	0.213	$S=\{t/(31.035+(t/4.2643))\}$	20-08-04	30-12-05	0.99
PCT 8	1.68	0.0078	1.5	5.5	10	0.168	$S=\{t/(126.95+(t/1.6849))\}$	19-06-04	30-12-05	0.93
PCT 11	4.68	0.025	4.2	4.6	15	0.312	$S=\{t/(39.711+(t/4.688))\}$	15-06-04	30-12-05	0.98
PCT 13	9.68	0.0166	8.7	14	25	0.38	$S=\{t/(60.042+(t/9.689))\}$	13-07-04	30-12-05	0.98
PCT 14	11.64	0.013	10.4	21.5	25	0.46	$S=\{t/(75.169+(t/11.641))\}$	6-07-04	30-12-05	0.95
PCT 15	7.147	0.0136	6.4	12.9	15	0.47	$S=\{t/(73.46+(t/7.147))\}$	6-07-04	30-12-05	0.98
PCT 16	3.81	0.00692	3.4	13.5	18	0.21	$S=\{t/(144.35+(t/3.8197))\}$	2-07-04	30-12-05	0.85
PCT 19	18.86	0.0069	16.9	66	25	0.75	$S=\{t/(144.13+(t/18.86))\}$	30-08-04	30-12-05	0.23
PCT 34	12.72	0.012	11.4	25	20	0.63	$S=\{t/(79.816+(t/12.7226))\}$	15-06-04	23-05-05	0.47

Tabla 3 Parámetros modelo hiperbólico de los puntos de control topográfico con mejor registro de asentamientos localizados sobre la masa de residuos del relleno sanitario La Pradera (vaso La Carrilera).

Se puede notar que los valores de asentamientos últimos encontrados en el vaso La Carrilera, son superiores a los encontrados en La Curva de Rodas, a pesar de tenerse en el primero un espesor menor de residuos; esto se puede explicar porque el proceso constructivo de ambos rellenos sanitarios fue diferente, mientras la construcción de Curva de Rodas duró seis años, dándose tiempo para que ocurrieran procesos de descomposición y degradación de los residuos los cuales iban sufriendo asentamientos en el tiempo; en el vaso La Carrilera el proceso constructivo de disposición de los residuos duró solo 6 meses. Adicional a lo anterior se puede mencionar también la forma de instalación de la instrumentación, mientras en Rodas pasaron 6 años en los cuales no se conocieron los asentamientos que se dieron; en el vaso La Carrilera se han podido obtener los registros de los asentamientos a partir de concluirse el proceso constructivo del mismo.

De todos los puntos de control topográfico estudiados sólo el punto 19, muestra un resultado ilógico en el tiempo para que ocurra el 90% del asentamiento último esperado. Para los demás puntos se ha encontrado un tiempo mínimo de asentamiento último de 3.2 años y un tiempo máximo de asentamiento de 21.5 años.

El menor valor de velocidad de asentamiento lo registra el punto 08, correspondiendo a 0.0008 m/día; mientras que el mayor valor lo registra el punto 05 con 0.019 m/día. El punto 08 tiene una altura de residuos de 10.0 m mientras que el punto 05 tiene una altura de residuos de 20.0 m, por lo tanto se tiene mayor asentamiento y mayor velocidad del mismo a mayores alturas de residuos.

En el vaso La Carrilera del relleno sanitario La Pradera, los puntos de control topográfico que presentan la mayor tasa de asentamiento son el PCT 5 y el PCT 13, con valores promedio de 0.0079 m/día y 0.0093 m/día respectivamente. En general se observa que la tasa de asentamientos para todos los puntos disminuye a medida que pasa el tiempo, siendo los primeros 100 días los que presentan la mayor velocidad de asentamientos, correspondiendo a un valor promedio de 0.010 m/día, este valor va disminuyendo progresivamente entre 100 y 200 días a un valor promedio para la zona de 0.0064 m/día, continua su disminución entre 200 y 300 días a un valor promedio de 0.0053 m/día, pasa luego entre 300 y 400 días a un valor promedio de 0.0036 m/día, para finalmente entre 400 y 600 días alcanzar un valor promedio de 0.0024 m/día; correspondiendo el anterior análisis a los asentamientos registradas por todos los puntos, hasta el 31 de diciembre de 2005.

4.7 RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE POROS Y LOS ASENTAMIENTOS

Con el fin de obtener una relación entre los asentamientos registrados por los puntos de control topográfico dispuestos sobre la masa de residuos, y los cambios en las presiones registradas por los piezómetros ubicados cerca a los puntos de control topográfico analizados con registros de asentamientos mas largos; se procedió a analizar los resultados de los siguientes elementos de la instrumentación:

Para el Relleno Sanitario Curva de Rodas:

- Con el Punto de Control Topográfico 2: Piezómetros 10, 20, 19, 34.
- Con el Punto de Control Topográfico 3: Piezómetros 1, 22, 10, 30.
- Con el Punto de Control Topográfico 12: Piezómetros 18, 20, 34.
- Con el Punto de Control Topográfico 13: Piezómetros 1, 22, 30.
- Con el Punto de Control Topográfico 15: Piezómetros 34, 25, 45.
- Con el Punto de Control Topográfico 14: Piezómetros 22, 24, 45.

Para el Relleno Sanitario La Pradera vaso La Carrilera:

- Con el Punto de Control Topográfico 34: Piezómetros 4, 7.
- Con el Punto de Control Topográfico 19: Piezómetros 14, 15.
- Con el Punto de Control Topográfico 4: Piezómetros 14, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 5: Piezómetros 18, 16.
- Con el Punto de Control Topográfico 8: Piezómetros 15, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 11: Piezómetros 16, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 13: Piezómetros 15, 16, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 14: Piezómetros 16, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 15: Piezómetros 15, 18.
- Con el Punto de Control Topográfico 16: Piezómetros 15, 16, 18.

La presión de poros corresponde a la registrada en los instrumentos, la cual no diferencia entre la presión debida al gas y la asociada al lixiviado; (lo anterior seria una limitante en los resultados obtenidos al hacer las correlaciones; sin embargo, los resultados dan valores que muestran el comportamiento de cada relleno según la etapa de compresibilidad o de deformabilidad en que se encuentren); el esfuerzo vertical se calcula como el peso de la columna de material colocado sobre el piezómetro. Para los residuos sólidos analizados se consideró un peso unitario de 1.1 ton/m³, obtenido de consulta de información secundaria de ensayos de densidad, reportados por INTEGRAL (2001) para la Curva de Rodas y por Espinosa y González (2001) para el relleno sanitario Doña Juana en la ciudad de Santa Fé de Bogotá.

Se utilizó el principio de los esfuerzos efectivos; que dice que si se considera un elemento de volumen diferencial, ubicado dentro de una masa de suelo, por debajo de la posición del nivel freático; se tiene que aunque no haya sobrecarga en la superficie del terreno, a causa del peso propio del suelo existe una presión transmitida de grano a grano en su esqueleto sólido llamada presión intergranular; al mismo tiempo se da que el agua que hay en su interior está soportando una presión debida a su propio peso, llamada presión hidrostática o intersticial. La presión

total que actúa en el punto donde se encuentra dicho elemento de volumen es igual a la suma de la presión intergranular y de la intersticial.

Lo anterior se puede expresar por la siguiente ecuación: $\sigma = \bar{\sigma} + u$; donde:

σ = presión total.

$\bar{\sigma}$ = presión intergranular o efectiva

u = presión intersticial o neutra.

Con el fin de obtener índices comparativos de compresibilidad volumétrica para los residuos sólidos que constituyen los rellenos sanitarios estudiados; a partir del comportamiento de las presiones de poros y su relación con los asentamientos en los mismos periodos de tiempo; se han utilizado las siguientes relaciones matemáticas:

Para las presiones:

$$\sigma = \bar{\sigma} + u$$

$$Ru = \frac{u}{\sigma}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - u$$

$$\bar{\sigma} = \sigma - Ru * \sigma$$

$$\bar{\sigma} = \sigma (1 - Ru)$$

Para los asentamientos:

$$\Delta S = (mv) (\Delta \bar{\sigma}) (\Delta H); \text{ donde:}$$

σ = esfuerzo total

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo efectivo

u = presión de poros

ΔS = diferencia de asentamientos en el tiempo

$\Delta \bar{\sigma}$ = diferencia de esfuerzos efectivos

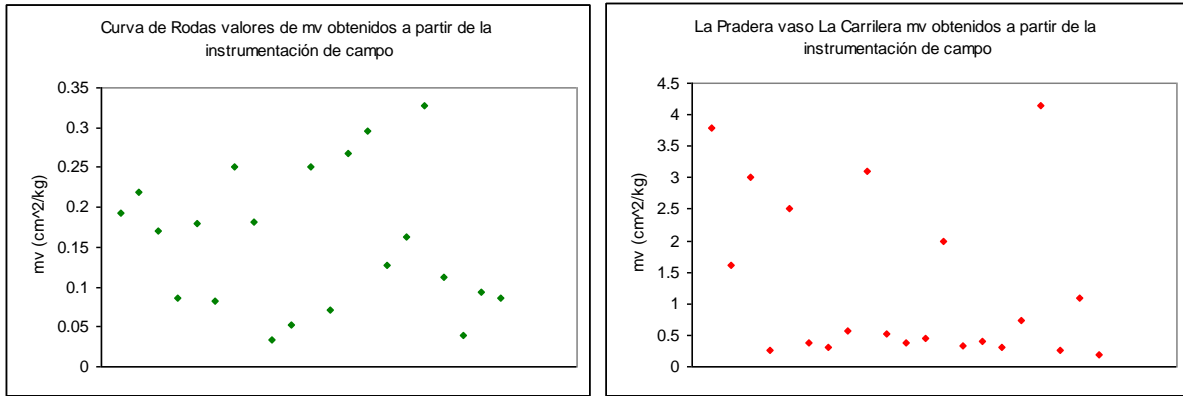
ΔH = espesor de residuos asociados a cada punto de control topográfico y a cada piezómetro.

mv = módulo de compresibilidad volumétrica

4.7.1 Análisis y limitaciones de los índices comparativos de compresibilidad obtenidos. Las figuras 9 y 10; nos muestran los valores de los mv para los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera vaso La Carrilera, respectivamente; obtenidos directamente del análisis de la instrumentación de campo, realizada desde mediados del año 2003 hasta el mes de febrero del año 2006, para la Curva de Rodas y desde el mes de octubre del año 2004 – enero del año 2005; hasta el mes de diciembre del año 2005 para el vaso La Carrilera del relleno sanitario La Pradera; se puede observar como el mv del vaso La Carrilera es mucho mayor que el obtenido para la Curva de Rodas, lo cual es coherente con los valores de asentamientos registrados para cada relleno.

Para la Curva de Rodas el mv encontrado es superior a 0.0033 m²/ton (0.033 cm²/kg) e inferior a 0.0328 m²/ton (0.328 cm²/kg); tal como se puede apreciar en la figura 9.

Para el vaso La Carrilera el mv encontrado es en general superior a 0.02 m²/ton (0.2 cm²/kg) e inferior a 0.414 m²/ton (4.14 cm²/kg); tal como se puede apreciar en la figura 10; estos resultados simplemente muestran o corroboran lo ya enunciado sobre la gran deformabilidad que se ha dado y que se da actualmente en el vaso La Carrilera, debido a lo jóvenes que están los desechos sólidos y a que todavía se están dando procesos de degradación bioquímica en los mismos, reflejándose en los asentamientos que se dan al interior del vaso.



Figuras 9 y 10 Valores de mv obtenidos para los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera vaso La Carrilera

Los parámetros obtenidos deben ser mirados con cautela ya que los residuos sólidos se ajustan a medios parcialmente saturados, además las deformaciones son esencialmente tridimensionales, son medios degradables en los cuales el contenido de sólidos se reduce con el tiempo y se transforman en líquido y gas y parte de la deformación proviene de esta reducción de sólidos, por lo tanto el parámetro obtenido denominado mv varía con la composición de los desechos y con el tiempo, dependiendo de la velocidad de degradación, por lo tanto deben ser tomados como índices comparativos de compresibilidad, pero no como parámetros de cálculo.

La figura 11 muestra la relación existente entre el mv y la edad de los residuos, se puede observar como se tiene un mv mayor para el caso de residuos jóvenes, con una edad inferior a 2.5 años como es el caso del vaso La Carrilera del relleno sanitario La Pradera; mientras que para el caso de la Curva de Rodas, donde se tienen residuos más antiguos; con una edad superior de 6.0 años el mv tiende a disminuir; lo anterior se debe a que mientras más recientes estén los residuos se tendrán mas fenómenos de descomposición de la materia orgánica lo cual incide de manera directa en la deformabilidad del relleno sanitario.

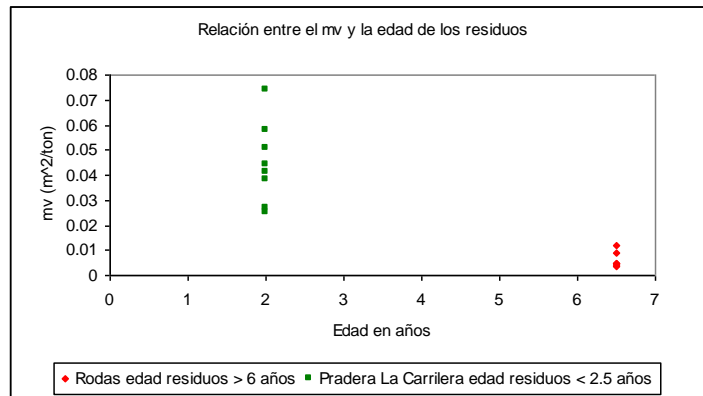


Figura 11 Relación entre el mv y la edad de los residuos de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera (vaso La Carrilera)

5. CONCLUSIONES

El modelo hiperbólico aplicado a los rellenos sanitarios Curva de Rodas y Parque Ambiental La Pradera vaso La Carrilera, arrojó resultados o ajustes bastante buenos; para los registros de asentamientos obtenidos de los puntos de control topográficos, dispuestos sobre la masa de residuos, lo anterior evidencia que el modelo es aplicable y es el que mejor describe los asentamientos en un relleno sanitario.

Para el Relleno Sanitario Curva de Rodas se encontró que el asentamiento último promedio esperado es de 2.54 m; con una tasa inicial de asentamiento de 0.0046 m/día; el tiempo para que ocurra el 90% del asentamiento del relleno es en promedio de 13.1 años, medidos a partir del mes de junio del año 2002 (fecha a partir de la cual comienza a aplicarse el modelo hiperbólico).

Para el vaso La Carrilera de La Pradera se encontró que el asentamiento último promedio esperado es de 7.65 m; con una tasa inicial de asentamiento de 0.014 m/día; el tiempo para que ocurra el 90% del asentamiento del relleno es en promedio de 17 años, medidos a partir del mes de junio del año 2004 (fecha a partir de la cual comienza a aplicarse el modelo hiperbólico).

En los dos rellenos sanitarios estudiados, se comprobó que la presión de poros tiende a disminuir con el tiempo, presentando un incremento al inicio de la colocación de la basura debido a la descomposición inicial de la materia orgánica presente en los desechos sólidos.

El análisis matemático, utilizando las herramientas del cálculo de las funciones de tipo hiperbólico de la forma

$$S(t) = \frac{t}{a + \frac{t}{b}} = \frac{bt}{t + ab} \quad \text{para } a, b \text{ constantes positivas y } t \geq 0; \text{ mostró que la recta } S = b \text{ es una asíntota}$$

horizontal; además de que las funciones son crecientes; cóncavas hacia abajo, sin puntos de inflexión para todo $t > 0$. Algebraicamente se puede decir que las funciones pertenecen a las cónicas de tipo hipérbolas, rotadas un ángulo de 45° .

En los dos rellenos sanitarios estudiados, se comprobó que la presión de poros tiende a disminuir con el tiempo, presentando un incremento al inicio de la colocación de la basura debido a la descomposición inicial de la materia orgánica presente en los desechos sólidos.

Los valores de los m_v obtenidos directamente del análisis de la instrumentación de campo, realizada desde mediados del año 2003 hasta el mes de febrero del año 2006, para la Curva de Rodas y desde el mes de octubre del 2004 hasta el mes de diciembre del año 2005 para el vaso La Carrilera; muestran como el m_v de La Pradera es mayor al obtenido para la Curva de Rodas, lo cual es coherente con los valores de asentamientos registrados para cada relleno en el intervalo de tiempo ya mencionado; ya que el vaso La Carrilera ha presentado y presenta una mayor deformabilidad.

Para la Curva de Rodas el m_v calculado a partir del análisis de los cambios de asentamientos con los cambios de las presiones de poros en un mismo intervalo de tiempo; es superior a $0.033 \text{ cm}^2/\text{kg}$ e inferior a $0.328 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

Para el vaso La Carrilera el m_v calculado a partir del análisis de los cambios de asentamientos con los cambios de las presiones de poros en un mismo intervalo de tiempo; es superior a $0.2 \text{ cm}^2/\text{kg}$ e inferior a $4.14 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

El m_v se puede correlacionar con la edad de los residuos, ya que se ha obtenido un m_v mayor para el caso de residuos jóvenes, con una edad inferior a 2.5 años como es el caso del vaso La Carrilera del relleno sanitario La Pradera; mientras que para el caso de la Curva de Rodas, donde se tienen residuos más antiguos; con una edad superior de 6.0 años el m_v tiende a disminuir; lo anterior se debe a que mientras más recientes estén los residuos se tendrán más fenómenos de descomposición de la materia orgánica lo cual incide de manera directa en la deformabilidad de los rellenos sanitarios.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CARVALHO, M. F. Comportamiento mecánico de residuos sólidos urbanos. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de Sao Paulo, 1999. 300 p.
- ESPINACE A. R.; PALMA G. J.; SZANTO N. M. La geotecnia ambiental aplicada a los vertederos sanitarios, 2002.



- ESPINOSA A. Y GONZÁLEZ A. J. (2001). Falla del Relleno Sanitario Doña Juana – Bogotá, Colombia. I - Las basuras acumuladas como material geotécnico. III Simposio Panamericano de Deslizamientos. Cartagena Colombia.
- FARIAS, A. B. Parámetros de compresibilidad de residuos sólidos urbanos. Tesis de Maestría. U.F.P.E, 2000. 86 p.
- FERREIRA, G. Modelo para evaluación de asentamientos en Rellenos Sanitarios Urbanos. Tesis de Magíster. Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, 2000. 136 p.
- HIDROSUELOS . Evaluación hidrogeológica y geotécnica de las áreas A-5, A-6 y de la zona de disposición en la cárcava I del sitio de disposición final de residuos sólidos “El Carrasco”. 2002.
- INTEGRAL S.A. Relleno Sanitario Curva de Rodas, Asesoría Técnica. Informe de estabilidad. 2001.
- LING, H.; LESHCHINSKY D.; MOHRI Y.; KAWABATA T. Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 124, N° 1, January, 1998.
- MACHADO, S.; CARVALHO, M.; VILAR O. Constitutive model for municipal solid waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol 128 N° 11, November, 2002.
- ORDÓÑEZ, C.A.. (2007) Calibración de modelos geotécnicos para simular el comportamiento de los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera mediante registros de instrumentación. Tesis de Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 124 p.
- QUIAN, X; KOERNER, R; GRAY, D. Geotechnical Aspects of landfill design and construction. Prentice Hall, Inc, U.S.A., 2002.
- SANDOVAL, J.; VALVERDE J.; GONZÁLEZ A. (2005). Deformabilidad del Relleno Sanitario de Doña Juana. En memorias XIII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana – VI Foro sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá. Sociedad Colombiana de Ingenieros. 26 a 28 de octubre.
- VILLARRAGA, M.; RODRIGUEZ J.; VELANDIA E. (2001) Evaluación de la amenaza por deslizamiento durante sismo en el relleno sanitario de Bogotá. III Simposio Panamericano de Deslizamientos. Cartagena Colombia.